

< 논문 >

단열 진공유리의 제작 및 열전달계수 측정에 관한 실험적 연구

이보화* · 윤일섭** · 송태호† · 곽호상***
(2006년 2월 20일 접수, 2006년 6월 7일 심사완료)

Experimental Study on Manufacturing of Insulation Vacuum Glazing and Measurement of the Thermal Conductance

Bo-Hwa Lee, Il Seob Yoon, Tae-Ho Song and Ho Sang Kwak

Key Words : Insulation(단열), Vacuum Glazing(진공유리), Guarded Hot-plate Apparatus(가드열판기), Low Emittance Coated Glass(저 방사코팅 유리), Thermal Conductance(열전달계수)

Abstract

Window is a critical component in the design of energy-efficient buildings. To minimize the heat loss, insulation performance of the glazing has to be improved. Manufacturing of vacuum glazing has been motivated by the possibility of making windows of very good thermal insulation properties for such applications. It is made by maintaining vacuum in the gap between two glass panes. Pillars are placed between them to withstand the atmospheric pressure. Edge covers are applied to reduce conduction through the edge. Accurate measurements have been made of the radiative heat transfer, the pillar conduction and the gas conduction using a guarded hot plate apparatus. Vacuum glazing is found to have low thermal conductance roughly below $1\text{W/m}^2\text{K}$. Among the heat transfer modes of residual gas conduction, conduction through support pillar and the radiative heat transfer between the glass panes, the last one is the most dominant to the overall thermal conductance. Vacuum glazing using very low emittance Al-coated glass has an overall thermal conductance of about $0.7\text{W/m}^2\text{K}$.

기호설명

- A : 면적(m^2)
- a : 지지기둥의 한 변의 길이(mm)
- h : 대류열전달계수($\text{W/m}^2\text{K}$)
- k : 열전도계수(W/mK)
- L : 길이(mm)
- P : 잔류가스의 압력(Pa)
- Q : 열량(mW)
- T : 온도($^{\circ}\text{C}$)
- t : 두께(mm)
- $U_{\text{air(glass)-glass(air)}}$: 열전달계수($\text{W/m}^2\text{K}$)
- $U_{\text{warm air-cold air}}$: 총합열전달계수($\text{W/m}^2\text{K}$)
- σ : 스테판-볼츠만 상수
- λ : 지지기둥 사이의 거리(mm)

1. 서론

건물 외벽에서의 열손실은 열적으로 취약한 유리창을 통해 크게 일어나며 에너지 소비의 중요한 원인이 된다. 따라서 건물 내의 에너지효율을 높이려면, 유리의 단열성능을 향상시켜야만 한다. 기존에 나온 유리창의 종류에 대하여 살펴보면 다음과 같다. 가장 간단히 한 장의 유리만을 사용하면 실내 측과 실외 측의 열전달계수를 차후에 언급할 데이터를 인용하면, 두께 4 mm의 소다석회유리에 대해 실내공기에서 실외공기까지 약 $6\text{W/m}^2\text{K}$ 의 총합열전달계수⁽¹⁾를 가진다. 이에 비해 복층유리는 약 $3\text{W/m}^2\text{K}$ 의 총합열전달계수를 가지게 된다. 유리 두 장 사이에 크립톤, 제논과 같이 낮은 열전도계수를 가지는 가스를 채워 넣은 경우 이보다 조금 더 낮은 총합열전달계수를 가지게 된다. 그런데 이보다도 유리 두 장 사이에 공기의 흐름을 없앤 진공유리의 경우 $1.0\text{W/m}^2\text{K}$ 이하의 총합열전달계수를 가져 가장 좋은 단열재 역할을 하게 된

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : thsong@kaist.ac.kr

TEL : (042)869-3072 FAX : (042)869-8207

*** 회원, 금오공과대학교 기계공학과

** 한국과학기술원 기계공학과

* 한국항공우주연구원 항공추진그룹

다.

진공유리를 제작 생산함에 있어 두 장의 유리 사이에 진공을 유지하기 위해서는 유리의 모서리를 접합한 후 진공을 유지하게 된다. 종래에는 진공 챔버 안에서 레이저를 이용하여 모서리를 용접하여 진공유리를 제조한 방식⁽²⁾을 사용한 적이 있었다. 이러한 방식은 레이저 용접 시 레이저에 의해 산화된 유리가 레이저의 렌즈에 증착하게 되고 이로 인해 빛을 차단하거나 효율을 감소시키는 문제점이 있다. 또한 별도의 진공 챔버를 이용하여야 하는 번거로움이 있어서 생산성이 저하된다.

한편, 시드니 대학⁽³⁾에서는 진공유리의 모서리 접합을 위해 저융점 글라스를 바른 후 약 500℃의 가열로에 넣어 유리와 유리를 접합시켰다. 그런 다음 진공튜브를 사용하여 공기를 뽑은 후 튜브를 용접하여 진공유리를 제조하는 방법을 사용하였다. 이 방법은 레이저 용접법보다는 효율적이지만, 이 또한 고온의 가열로를 사용하여야 하고 제작 시간이 많이 소요된다는 문제를 가지고 있다. 무엇보다 큰 문제점은 저융점 글라스를 사용하여 모서리를 접합시켰기에 외부의 온도 차로 인하여 고온 측의 유리가 팽창되어 부풀어 오르는 한편, 모서리를 통한 열 흐름이 생겨 이를 통한 열손실이 설계상에 있어 중요한 문제점으로 대두 되었다.

따라서 본 논문에서는 진공유리를 제작함에 있어 모서리를 통한 열손실을 최소화하고, 내부 응력장을 견딜 수 있는 유동적인 모서리접합(flexible edge seal)의 새로운 방법을 제안하고자 한다. 이것은 모서리에 용접 대신 고무가스켓을 사용한 것으로 유리판이 모서리에서 미끄러질 수 있게 하여 부풀어오름을 방지하는 것이다.

또한, 진공유리를 통한 열전달 모드 중에서 유리창 내부의 진공을 통한 복사열전달이 상당히 크며, 이를 줄이기 위해서는 저방사율을 가지는 코팅유리의 사용이 불가피하다. 따라서 이러한 코팅유리의 종류에 따른 진공유리의 열전달계수를 측정하여 복사열전달의 상대적인 크기를 비교해 보고자 한다.

2. 진공유리

2.1 진공유리를 통한 열전달 모드

닫힌 창에서의 열전달은 다음의 세 가지 과정에 의해 지배된다. 즉 따뜻한 쪽의 공기로부터 유리 표면까지의 열전달, 유리창 자체를 통한 열전달 그리고 차가운 유리 면에서 주위 공기로의 열전달이 있다.

따뜻한 실내 면과 실내 공기로부터 실내 유리면까지의 열전달은 복사열전달과 자연대류열전달이 동시에 일어나며 주위온도와 실내 공기온도는 같다고 가정한다. ASTM Standard⁽⁴⁾는 이러한 면에서의 열전달계수를 다음과 같이 규정하였다.

$$U_{\text{warm air-glass}} = 8.3 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (1)$$

유리의 차가운 실외면에서 외기로의 열전달은 자연대류와 강제대류 그리고 복사열전달을 포함한다. 이 면에서는 일반적으로 열전달 모드 중 강제대류가 우세하다고 가정된다. ASTM Standard⁽⁴⁾를 인용하면,

$$U_{\text{glass-cold air}} = 30 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (2)$$

이다. 이러한 값들을 이용하여 닫힌 창을 통한 실내공기에서 실외공기에 이르는 총합열전달계수 $U_{\text{warm air-cold air}}$ 는

$$\frac{1}{U_{\text{warm air-cold air}}} = \frac{1}{U_{\text{warm air-glass}}} + \frac{1}{U_{\text{glass-glass}}} + \frac{1}{U_{\text{glass-cold air}}} \quad (3)$$

과 같이 표현된다. 여기서 $U_{\text{glass-glass}}$ 는 안팎의 유리면 사이의 열전달계수로서 유리층의 구조에 따라 이 값이 좌우된다.

Fig. 1은 진공유리의 개략도인데 이를 통한 열전달 모드는 유리 두 장 사이가 진공이지만 완벽한 진공이란 있을 수가 없고 남아있는 미량의 잔류가스를 통하여 전도(U_{gas})가 있다. 그리고 내부 진공으로 인해 유리의 바깥 면에서 대기압이 작용하는 바, 유리 두 장 사이의 간극을 일정하게 유지하기 위해 압축강도가 높은 지지 기둥(support pillar)을 두 장의 유리 사이에 일정한 간격으로 설치하게 된다. 이러한 구조에서의 열전달모드는 지지기둥을 통한 전도($U_{\text{conduction}}$)와 내부 진공을 통한

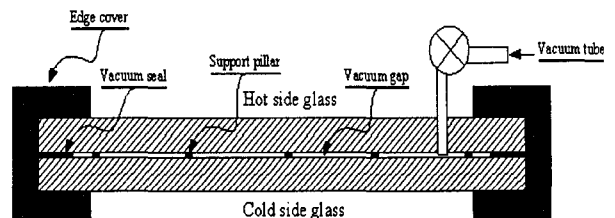


Fig. 1 Schematic diagram of the vacuum glazing

복사열전달($U_{radiation}$)이 있다. 또 진공을 유지하기 위해 모서리를 접합하게 되는데 이러한 모서리를 통한 전도(U_{edge})가 있다. 따라서, 진공유리 자체를 통한 열전달계수⁽⁵⁾는 다음과 같다.

$$U_{glass-glass} = U_{gas} + U_{conduction} + U_{radiation} + U_{edge} \quad (4)$$

2.1.1 지지기둥을 통한 전도

두 장의 유리판이 주위 대기압을 견디면서 유리판 사이를 일정 간격으로 유지할 수 있어야 한다. 이러한 목적으로 지지기둥을 유리판 사이에 일정한 간격으로 배치한다. 각각의 지지기둥들은 유리판 사이에서 열적인 다리 역할을 하며 이를 통해 열전도는 온도가 높은 쪽에서 온도가 낮은 쪽으로 일어난다. 지지기둥 재료의 열전도계수는 유리판의 열전도계수보다 높다. 이 때문에 전체 온도 차의 매우 작은 비율이 지지기둥의 끝에서 존재하고 이 온도 차의 대부분은 각각의 지지기둥의 끝부분에서 매우 가까운 부근의 유리판 내에서 존재한다. 만약에 유리판이 반무한 두께와 넓이라고 가정하면, 유리에서 열흐름과 관계된 지지기둥 하나를 통한 열전도형상계수(heat conduction shape factor; $q = kS\Delta T$) S 는

$$S = 2a \quad (5)$$

로 간단히 나타낼 수 있다. 일정한 간격(λ)의 사각 배열로 유리판 위에 위치시킨 가로, 세로, 높이가 각각 $a \times a \times a/2$ 인 육면체 지지기둥을 통한 열전달계수⁽⁶⁾는

$$U_{conduction} = 2k_{glass}a/\lambda^2 \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다. 지지기둥의 재질은 압축강도가 높고 열전도계수($=3\sim 4\text{W/mK}$)가 낮은 지르코니아를 사용하였으며 각기둥 형태로 제작하였다. 이 기둥의 한 변의 길이는 $a = 0.4$ mm이다. 유리 한 장의 두께가 3.2 mm인 필킹톤 TEC15 유리(Pilkington TEC15 glass) 두 장 사이에는 대기압의 영향을 충분히 견디도록 하기 위해 지지기둥을 $\lambda = 23$ mm의 간격으로 배치하였고, 5 mm 두께의 일반유리와 6 mm 두께의 필킹톤 저방사유리(Pilkington Low-E glass)에는 $\lambda = 35$ mm로 배열하였다. 각각 $0.75 \text{ W/m}^2\text{K}$, $0.35 \text{ W/m}^2\text{K}$ 의 열전달계수를 가진다.

2.1.2 진공유리를 통한 복사열전달

유리는 본질적으로 적외선 영역($4\text{--}40 \mu\text{m}$)에서 불투명하다. 그러므로 진공유리를 통한 복사열전달

은 마주보고 있는 진공유리 내부표면 사이에서 일어난다. 면적 A 인 두 평판의 표면 방사율이 파장에 크게 의존하지 않는다면, 복사열전달률은 참고문헌^(7,8)로부터 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$Q_{radiation} = \frac{\sigma A(T_h^4 - T_c^4)}{\frac{1}{\epsilon_h} + \frac{1}{\epsilon_c} - 1} \quad (7)$$

윗 식으로부터 복사열전달에 의한 열전달계수는 다음과 같다.

$$U_{radiation} = \epsilon_{effective} \sigma (T_h^2 + T_c^2) \cdot (T_h + T_c) \quad (8)$$

여기서 $\epsilon_{effective} = 1/(1/\epsilon_h + 1/\epsilon_c - 1)$ 이다. 일반유리 한 면에서의 방사율은 $\epsilon_h = \epsilon_c = 0.855$ ⁽⁹⁾이다. 따라서 $\epsilon_{effective}$ 는 0.746의 값을 가진다. 또, 이산화주석(SnO_2)이 $0.33 \mu\text{m}$ 의 두께⁽¹⁰⁾로 하드 코팅된 필킹톤 TEC15 유리와 필킹톤 저방사유리의 경우는 한 면의 방사율이 0.203 이므로 코팅된 면을 마주보게 할 경우 $\epsilon_{effective}$ 는 0.113의 값을 가진다. 이처럼 코팅재료의 방사율에 의해 복사열전달은 많은 영향을 받으며, 다양한 코팅 재료의 유리에 대해 조사해 볼 필요성이 있다.

2.1.3 잔류가스를 통한 전도

진공도가 높지 않으면 잔류 가스를 통해서 전도가 일어난다. 이때 열전달모드를 자유분자운동에 의한 열전도라고 본다. 이때에 열유속은 압력에 비례한다. 즉, 참고문헌⁽¹¹⁾로부터

$$Q_{molecular} = 0.375 PA(T_h - T_c) \quad (9)$$

이다. 본 연구에서 제작한 진공유리내의 진공도는 10^{-3} torr 로 낮은 압력에서 잔류 가스를 통한 전도로 보고 해석할 수 있다. 따라서, 진공유리내의 잔류가스를 통한 열전달계수는 다음처럼 매우 작다.

$$U_{gas} = 0.15 \text{ W/m}^2\text{K} \quad (10)$$

2.1.4 모서리를 통한 전도

두 유리판 사이에 온도차가 존재함으로 인해서 모서리 접합부위를 통한 전도가 일어난다. 이러한 영향을 줄이기 위해 Fig. 2의 (a)에서처럼 U자 형태의 단면을 갖는 모서리 단열재를 설계하였다. 이 때에 유리면은 단열재를 통해서 실내 공기 혹은 실외 공기와 열을 주고 받으면서 동시에 U자

형상을 따라 온도구배가 있어서 열전도를 행한다. 이 문제는 마치 흰(fin)이 전도와 대류에 놓인 상황과 같다. 그래서 이 상황을 Fig. 2의 (b)처럼 근사화해서 모서리 단열재는 $T(0)=T_w$ 인 바탕표면에 붙어있고, 온도 T_∞ 인 유체 내로 확장되었다고 가정하면,

$$\frac{d}{dx}(k_{glass}t_{glass} \frac{dT}{dx}) = h(T - T_\infty) \quad (11)$$

로 된다. T_w 와 T_∞ 인 유체간의 온도차이를 θ_b 라 하고 $m^2 = h/(k_{glass}t_{glass})$ 라 하면, 이러한 모서리 단열재를 통한 열전달량은 단위길이당

$$q_w = \frac{\sqrt{hk_{glass}t_{glass}} \theta_b}{\tanh mL} \quad (12)$$

로 표현되고 가로, 세로 각각 $L_0 \times L_0$ 의 이중유리에서

$$Q = U_{edge} L_0^2 2\Delta T = q_w \cdot 4L_0 \quad (13)$$

과 같이 표현되고, 열전달계수 U_{edge} 는

$$U_{edge} = \frac{q_w \times 4L_0}{L_0^2 \times 2\Delta T} \quad (14)$$

로 된다. 따라서,

$$U_{edge} = \frac{2\sqrt{hk_{glass}t_{glass}}}{L_0 \times \tanh mL_u} \quad (15)$$

으로 나타낼 수 있다. 여기서, 대류열전달계수 $h=3.71W/m^2K$, 유리의 열전도계수 $k_{glass}=1W/mK$, 유리의 두께 $t_{glass}=0.005m$ 그리고 $m=27.2m$ 이다. 한편 일정한 체적의 단열재를 써서 최소의 U_{edge} 를 얻기 위해서 다음과 같은 최적화를 수행하였다. 일단 다음과 같은 구속조건을 적용하였다.

$$t_u L_u = C \text{ (constant)} \quad (16)$$

이러한 조건하에서 본 논문에서 구한 최적 치수는 우레탄의 두께 $t_u=7 \text{ mm}$, 우레탄의 길이 L_u 는 33 mm 로 하였다. 최종적으로 모서리를 통한 열전달계수는 $L_0=250 \text{ mm}$ 일 때, 다음과 같다.

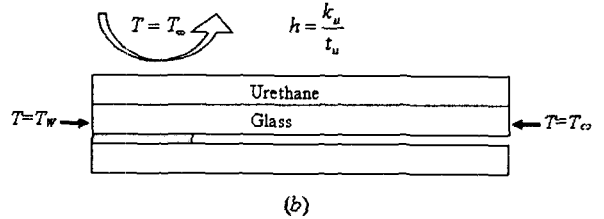
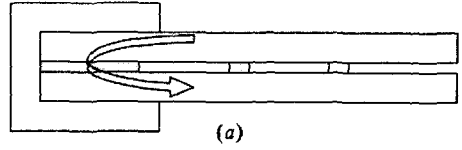


Fig. 2 Schematic diagram of edge insulator

$$U_{edge} = 1.52 W/m^2K \quad (17)$$

이 값은 다소 크지만 보다 대형의 유리에서는 L_0 에 반비례하여 충분히 작아진다.

3. 열전달계수 측정장치

3.1 측정원리

진공유리를 통한 열전달 모드는 진공유리 사이에 있는 잔류가스를 통한 열전도와 지지기둥을 통한 전도, 모서리를 통한 전도, 복사열전달이 있다. 모서리를 통한 전도는 모서리 부위에서만 중요하다. 중심부에서 열전달 모드는 잔류가스를 통한 전도, 지지기둥을 통한 전도와 복사열전달이 있다. 모서리를 통한 전도까지 모두 측정하자면 장치가 매우 크고 복잡해지므로 본 연구에서는 중심부에서의 국부열전달만 측정하였다. 국부열전달은 가드열판기(guarded hot-plate apparatus)의 원리⁽¹²⁾를 이용하여 측정하였다.

$$U_{glass-glass} = \frac{Q}{A \cdot (T_h - T_c)} \quad (18)$$

Fig. 3을 통해 이 장치의 원리를 보다 상술하면, 이하 구리블록이라 부르는 전도체를 진공유리의 한쪽 면에 잘 접촉시켜 놓는다. 이 구리블록을 둘러싼 일정한 높은 온도 T_h 로 유지되는 가드로 잘 위치시킨다. 이 구리블록과 가드는 진공유리에 고정시킬 때, 접촉저항의 영향을 줄이기 위해 잘 접촉시켜야 한다. 진공유리의 반대쪽 면은 낮은 온도 T_c 로 유지한다. 이 때 각각의 높은 온도 T_h 와

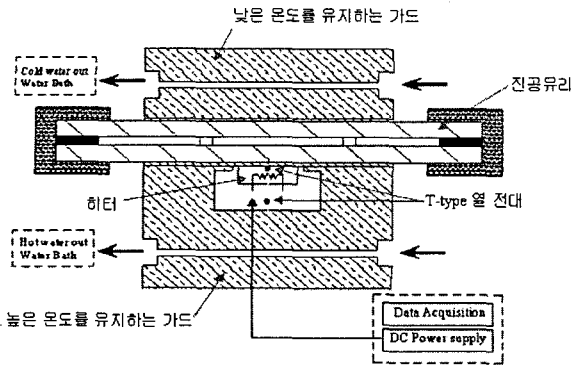


Fig. 3 Schematic diagram of experimental apparatus

낮은 온도 T_c 는 항온수조를 사용하여 그 정해진 온도로 일정하게 유지할 수 있게 하였다. 구리블록의 온도 T_m 은 T_h 보다 낮는데 T_m 의 온도를 올려 $T_m = T_h$ 가 되면, 구리블록과 가드 사이에는 열전달이 일어나지 않고, 구리블록에 가해지는 모든 열에너지는 진공유리를 통하여 낮은 온도의 가드로 흐르게 되는 것이다.

3.2 실험장치 및 방법

▪ 히터와 구리블록

히터는 구리블록에 열에너지를 공급하기 위해 필요한 부품이다. 두께 10 mm의 구리블록에 지름 6.4 mm의 히터가 들어갈 수 있게 구멍을 뚫고 그 안에 히터를 설치한 후 접착제로 고정하였다.

▪ 가드

두 개의 가드는 각각 항온수조를 사용하여 높은 온도와 낮은 온도를 유지할 수 있게 한다. 재질은 모두 순동이며, 지름은 100 mm로 하였다. 그 안에 물이 지나갈 수 있도록 구멍을 내었다.

▪ 측정면적의 결정

본 측정장치에서 장치의 민감도와 정확도를 결정하는 중요한 인자는 구리블록의 유효 면적이다. 구리블록과 가드 사이에는 2 mm의 간격이 있다. 즉, 구리블록은 원기둥 형태로 그 지름이 28 mm이고, 가드의 구멍은 지름이 32 mm이다. 실험에 사용할 구리블록의 유효 면적은 구리블록과 가드의 구멍 사이의 갭의 중간지점까지의 면적이다. 따라서 그 지름을 30 mm로 취하면 유효 면적 A 가 $7.1 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ 이 된다.

▪ 열에너지의 결정

구리블록에 가해지는 열에너지는 정전압 공급기(constant-voltage power supply)를 통해 공급된다. 이 값을 이용하여 열에너지의 값 Q 를 결정한다.

▪ 온도차의 측정

항온 수조를 사용하여 높은 온도를 유지하는 가

Table 1 Thermal conductance of vacuum glazing (Soda lime glass; 2 plates)

Power [mW]	Temperature [°C]	$U_{\text{glass-glass}}$ [W/m ² K]	
		Experimental results	Calculated results
18.0	8.9 / 3.0	4.30	4.18
18.0	24.7 / 20.0	5.40	4.86

드의 온도 T_h 와 구리 블록의 온도 T_m 이 같아질 때까지 계속 열에너지를 가하게 된다. 이때, 구리블록에 꽂혀있는 열전대를 사용하여 구리블록의 온도를 측정한다. $T_m = T_h$ 로 온도가 같은 정상상태가 되었을 때, 데이터 로거를 통하여 1초 간격으로 1시간 동안 읽어 들여, 이 값을 시간 적분하여 사용한다. 본 실험에서는 100°C 이하의 온도에서 정확성이 높은 지름 1.6 mm의 T 타입 열전대를 사용하여 구리블록의 온도를 측정하였다. 구리블록의 온도를 측정할 때 구리블록 내에 있는 두 개의 히터로부터 직접적인 열 영향을 줄이기 위해서 최대한 진공유리의 측정 면에 가깝게 구멍을 뚫고 열전대가 구리 블록의 중앙에까지 닿을 수 있게 하였다.

4. 열전달 계수 측정결과 및 분석

4.1 무코팅 진공유리의 열전달계수 측정

열전달계수를 측정하기 위해 가해지는 열에너지는 18.0 mW로 하였다. 낮은 온도는 3.0°C와 20.0°C로 두고 각각의 경우에 대하여 열전달계수를 측정하였다. 5 mm 두께의 무코팅 유리 두 장으로 제작한 진공유리를 실험을 통해 얻은 값($U_{\text{glass-glass}}$)과 이론적인 계산으로 얻은 값을 Table 1에 나타내었다. 열전달계수는 295K에서 5.40W/m²K의 값을 가진다. 또한, 이론값과 실험값은 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이것은 $U_{\text{air-air}} \approx 2.95 \text{ W/m}^2\text{K}$ 에 해당되는 값이다. Table 2는 5 mm 두께의 무코팅 유리 세 장을 겹쳐 두 개의 진공갭을 가진 진공유리를 통한 열전달계수를 측정한 것으로 열전달계수는 298K에서 2.67W/m²K의 값을 가진다. 이 값은 무코팅 유리 두 장을 이용하여 만든 진공유리보다 51% 낮아졌다. 그러나 Table 6을 통해 알 수 있듯이, 무코팅 일반유리 두 장을 겹친 진공유리를 통한 열전달 모드를 이론적으로 분석하면 복사열전

Table 2 Thermal conductance of vacuum glazing (Soda lime glass; 3 plates)

Power [mW]	Temperature [°C]	$U_{glass-glass}$ [W/m ² K]	
		Experimental results	Calculated results
18.0	13.5 / 3.0	2.42	2.38
18.0	29.5 / 20.0	2.67	2.74

Table 4 Thermal conductance of vacuum glazing (Pilkington Low-E glass)

Power [mW]	Temperature [°C]	$U_{glass-glass}$ [W/m ² K]	
		Experimental results	Calculated results
18.0	22.2 / 3.0	1.32	1.09
18.0	39.0 / 20.0	1.33	1.21

Table 3 Thermal conductance of vacuum glazing (Pilkington TEC15 glass)

Power [mW]	Temperature [°C]	$U_{glass-glass}$ [W/m ² K]	
		Experimental results	Calculated results
18.0	19.4 / 3.0	1.55	1.49
18.0	36.0 / 20.0	1.59	1.61

Table 5 Thermal conductance of vacuum glazing (Al-coated glass)

Power [mW]	Temperature [°C]	$U_{glass-glass}$ [W/m ² K]	
		Experimental results	Calculated results
18.0	35.6 / 3.0	0.78	0.65
18.0	50.8 / 20.0	0.82	0.66

달 $U_{radiation}$ 이 4.36 으로, 전체 열전달 모드 중에서 대략 90%로 상당한 비율을 차지함을 알 수 있다. 또한, 일반유리 세 장을 겹쳐 만든 진공유리를 통한 복사열전달 $U_{radiation}$ 은 2.24W/m²K 로 이로 인한 영향이 82%로 여전히 전체 열전달 모드에 상당한 영향을 끼침을 알 수 있다.

4.2 저방사코팅 진공유리의 열전달계수 측정

Table 3 은 두께 3.2 mm의 저방사코팅(이산화주석)이 된 필킹톤 TEC15 유리를 사용하여 얻은 결과이다. 낮은 온도 20°C에서 $U_{glass-glass}$ 가 약 1.59 W/m²K ($U_{air-air} \cong 1.27$ W/m²K)의 열전달계수를 가짐을 알 수 있다. 또한 진공유리를 통한 열전달 모드의 이론적인 분석을 통해 전체 열전달 모드 중에서 복사열전달의 영향이 0.71 로 크게 줄었으나, 상대적으로 지지기둥을 통한 전도가 0.75 로 47% 임을 알 수 있다.

Table 4 는 Table 3 과 같은 종류의 저방사 코팅이 된 두께 6 mm의 필킹톤 저방사 유리를 통해 얻은 결과이다. 이를 통해 $U_{glass-glass}$ 는 약 1.33 W/m²K ($U_{air-air} \cong 1.10$ W/m²K)임을 알 수 있다.

Table 3 과 Table 4 는 같은 종류의 저방사 코팅

이 된 유리를 사용하였음에도 두 진공유리에서 열전달모드가 차이 나는 이유는 다음과 같다. 즉, 전자(필킹톤 TEC15 유리)와 후자의 경우 각각 사용된 유리의 두께가 3.2 mm, 6 mm로 전자가 더 얇다. 따라서 대기압을 견디기 위해, 전자의 경우 내부에 더 많은 수의 지지기둥을 배열하였고, 이를 통한 열전도가 더 커졌기 때문이다.

Table 5 는 매우 낮은 방사율을 가지는 0.9 μm의 두께로 스퍼터링 공법으로 알루미늄 코팅을 한 5 mm 두께의 유리를 사용하여 얻은 결과이다. 열전달계 $U_{glass-glass}$ 는 20°C에서 0.82W/m²K ($U_{air-air} \cong 0.73$ W/m²K)로 실험에서 얻은 결과 중 가장 낮은 값을 가졌다. 이는 복사열전달의 영향이 상대적으로 매우 작기 때문이다.

Table 6 은 각 진공유리를 통한 열전달 모드의 상대적인 크기를 비교하기 위해 낮은 온도가 20°C에서 진공유리 자체를 통한 열전달계수를 이론적으로 분석한 것이다. 이를 통해서 지지기둥을 통한 전도의 영향은 필킹톤 TEC15 유리를 제외하고는 거의 일정함을 알 수 있고, 마주보는 두 유리면의 방사율에 따라 복사열전달의 영향이 크게 줄어들음을 알 수 있다. 이 상을 종합하여, 필킹톤 저방사유리를 사용하여 제작한 진공유리는 스티로폼

Table 6 Analysis of heat transfer modes

Vacuum glazing	Calculated results		
	$U_{radiation}$ [W/m ² K]	$U_{conduction}$ [W/m ² K]	U_{gas} [W/m ² K]
Soda lime glass (2 plates)	4.36	0.35	0.15
Soda lime glass (3 plates)	2.24	0.35	0.15
Pilkington TEC15 glass	0.71	0.75	0.15
Pilkington Low-E glass	0.71	0.35	0.15
Al-coated glass	0.07	0.44	0.15

($k=0.04\text{W/mK}$)보다 1/2 이상 작은 두께로도 28% 정도 줄어든 열전달계수를 갖는다는 것을 알 수 있다. 또한, 알루미늄 코팅유리를 사용한 진공유리는 스티로폼보다 56% 감소된 매우 낮은 열전달계수를 가진다. 이로부터 방사코팅된 진공유리의 보온성능이 매우 뛰어나음을 알 수 있다.

5. 결론

단열성능이 높은 진공유리를 구상하고, 그 열전달계수를 이론적으로 구하여 보았다. 실제 진공유리를 제작하고 총합열전달계수를 측정하는 장치를 만들어서 적용하였다. 이론값과 실험값은 10% 이내로 일치하였다.

단층유리에 있어서는 실내의 공기간의 총합열전달계수가 약 $6\text{W/m}^2\text{K}$ 인 데에 비하여 복층유리는 그 절반 정도의 총합열전달계수를 보이고, 또한 그 간극이 진공이고 두 내부표면에 이산화주석이 코팅된 유리를 사용한 경우 단층유리의 경우보다 1/3 이하의 값을 보인다. 또한 진공유리의 두 내부표면에 알루미늄이 코팅된 진공유리를 사용하면 총합열전달계수가 $0.73\text{W/m}^2\text{K}$ 까지 낮아진다. 이를 통해 진공유리의 성능은 무엇보다도 복사열전달의 영향을 가장 크게 받으며, 이에 따라 저방사율을 가지는 코팅유리를 사용해야 함을 잘 알 수 있었다.

이러한 진공유리가 건물이나 차량에 적용된다면 불필요한 에너지 손실을 막아서 그 냉난방부하를 크게 줄일 수 있다. 뿐만이 아니라 일반 냉장고와 김치냉장고, 냉동고에 적용하면 내부용적을 크게

늘릴 수 있을 것이며, 기타 다양한 활용분야가 기대된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(R01-2005-000-10682-0) 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Arasteh, D., Selkowitz, S. and Wolfe, J.R., 1989, "The Design and Testing of a Highly Insulating Glazing System for Use with Conventional Window Systems," *Journal of Solar Energy Engineering*, Vol. 111, pp. 44~53.
- (2) Benson, D. K., Tracy, C. E., Susemihl, J., Potter, T. and Soule, D. E., 1987, "Vacuum Window Glazings for Energy-efficient Buildings," International Report PR-3159, *Solar Energy Research Institute*, Golden, CO, pp. 887~904.
- (3) Robinson, S. J. and Collins, R. E., 1989, "Evacuated Windows-theory and Practice," ISES Solar World Congress, *International Solar Energy Society*, Kobe, Japan, pp. 887~904.
- (4) Determining the Steady State Thermal Transmittance of Fenestration Systems, ASTM Standard E. 1423, 1991.
- (5) Collins, R. E., Turner, G. M., Fischer-Cripps, A. C., Tang, J. -Z., Simko, T. M., Dey, C. J., Clugston, D. A., Zhang, Q. -C. and Garrison, J. D., 1995, "Vacuum Glazing-A New Component for Insulating Windows," *Building and Environment*, Vol. 30, pp. 459~492.
- (6) Wilson, C. F., Simko, T. M. and Collins, R. E., 1998, "Heat Conduction Through the Support Pillars in Vacuum Glazing," *Solar Energy*, Vol. 63, pp. 393~406.
- (7) Geotti-Bianchini, F. and Lohrengel, J., 1989, "Measured Angular Distribution of the Emissivity and Calculated Radiation Heat Transfer of Architectural Coated Flat Glass," Part 1, Theory, *Glastechnische Berichte*, Vol. 62, pp. 312~319.
- (8) Geotti-Bianchini, F. and Lohrengel, J., 1989, "Measured Angular Distribution of the Emissivity and Calculated Radiation Heat Transfer of Architectural Coated Flat Glass," Part 2, Results and Discussion, *Glastechnische Berichte*, Vol. 62, pp. 351~357.
- (9) Pilkington K glass information sheet, Pilkington Glass Limited, England, 1989.
- (10) Zhang, Q. -C., Simko, T. M., Dey, C. J., Collins, R. E. and Turner, G. M., 1997, "The Measurement and Calculation of Radiative Heat Transfer Between

- Uncoated and Doped Tin Oxide Coated Glass Surfaces," *Int. J. Heat Transfer*, pp. 61~71.
- (11) Corrucini, R. J., 1957, "Gaseous Heat Conduction at Low Pressures and Temperatures," *Vacuum*, Vol. 7, 8, pp. 19~29.
- (12) Collins, R. E., Davis, C. A., Dey, C. J., Robinson, S J., Tang, J. -Z. and Turner, G. M., 1993, "Measurement of Local Heat Flow in Flat Evacuated Glazing," *Heat Mass Transfer*, Vol. 36, No. 10, pp. 2553~2563.